

Зоны низких скоростей термобарической природы в кристаллической коре

© В. А. Корчин, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 15 декабря 2014 г.

Представлено членом редколлегии О. М. Русаковым

Наведено нову гіпотезу утворення, існування та зникнення корових зон низьких сейсмічних швидкостей (ЗНШ), виявлених методом ГСЗ, у вигляді пружних аномалій земної кори. Для гірських порід експериментально встановлено складні зміни $V_{P,S} = f(PT) = f(H)$ — зони інверсії швидкостей. В них спостерігається катакластичне розущільнення мінерального середовища — явище дилатансії. Ці зони за конфігурацією, місцем розташування і термодинамічними умовами добре збігаються з коровими пружними аномаліями, виявленими ГСЗ. Зони проявляються тільки тоді, коли температурний градієнт у корі перевищує певний поріг, а тиск не здатен компенсувати термічні порушення в породах. Наявність ЗНШ є об'єктивною реальністю, можливо, вони дуже поширені у земній корі. Потужність цих зон може збільшуватися з підвищенням інтенсивності теплового потоку або зниженням тепла в літосфері. На підставі вивчення зв'язку порового простору порід зі швидкістю встановлено збільшення пористості і тріщинуватості порід з глибиною в ЗНШ, що сприяє посиленню міграції та локалізації різних флюїдів, а також вуглеводнів глибинного походження. ЗНШ і пов'язані з ними глибинні явища і процеси найбільш доступні дослідженню різними геолого-геофізичними методами, у тому числі надглибоким бурінням. Детальніше перспективне вивчення ЗНШ дасть змогу проводити пошуки корисної мінеральної сировини та уточнити глибинну будову Землі, пояснити та передбачити процеси корових землетрусів, утворення нових розломних структур і сейсмічних меж.

Ключовые слова: фізичні властивості, зони низьких швидкостей, теплові режими, розущільнення порід, пористість, локалізація вуглеводнів.

Введение. Методические приемы геофизики и геологии, каким бы совершенством они не отличались, не позволяют получить однозначные исчерпывающие данные о вещественном составе глубинных горизонтов литосферы. Лишь на основании комплексного подхода, включающего петрофизическое моделирование, можно значительно сузить неоднозначность имеющейся геолого-геофизической информации. При истолковании аномалий геофизических полей информация о физических характеристиках минерального вещества используется, как правило, на качественном уровне и в большинстве случаев лишь формально. Были предложены и постоянно совершенствуются методики петрофизического моделирования с использованием экспериментальных данных об изменениях физических характеристик горных пород в различных PT -условиях опытов, соответствующих

таким для конкретных геологических регионов [Korchin, 2006 а, б, 2010 а; Корчин, 2013 а, б]. Петрофизическое термобарическое моделирование призвано не только копировать явления, но и раскрывать сущность и динамику геофизических процессов и явлений. Оно во многом обесценивается, если не позволяет количественно и качественно оценивать моделируемые явления, процессы и структуры, а также предсказывать их эволюцию в натуре.

Измеренные в условиях высоких давлений и температур скорости в различных комплексах горных пород имеют первостепенное значение при осуществлении всестороннего анализа материалов взрывной сейсмологии. При этом уточняются вещественная или термобарическая природа сейсмических границ, характер выделяемых разломов, объясняются особенности сейсмических и плотностных аномалий.

Глубинными сейсмическими исследованиями литосферы установлены аномалии упругого поведения минеральной среды на различных глубинах в виде так называемых зон низких скоростей (ЗНС) [Павленкова, 1973; Трипольский, Шаров, 2004 и др.].

Зоны выявлены в континентальной и океанической коре, в районах различной тектонической активности и расположены в основном на глубине 3—25 км (рис. 1). Природа зон недостаточно изучена. Одни исследователи полагают, что они вещественного происхождения, другие связывают их с тектоническими нарушениями сплошности коры (зоны повышенной трещиноватости, подобие горизонтальным разломам). Некоторые объясняют появление этих зон локальным обводнением пород соответствующих толщ коры. Существует также мнение, что в области ЗНС происходит понижение литостатического давления, обусловленное вздыманием верхней части пород земной коры над зоной за счет тектонических сил, направленных навстречу друг другу, и образованием упругой "арки". В результате такого снижения давления активизируются терморазрушающие процессы, которые приводят к образованию ЗНС. Наиболее полное и содержательное объяснение развития ЗНС в земной коре приведено в работах [Николаевский, 1996; Милановский, Николаевский, 2009, 2010]. В основу объяснения положено явление дилатансионного разрушения минеральной среды на определенных глу-

бинах коры. Математически дилатансионный эффект означает линейную пропорциональность неупругих приращений сдвига и объема или, более узко, объемные и сдвиговые неупругие деформации есть функции и давления, и касательного напряжения. В скальных породах эффект обусловлен развитием системы микротрещин и проявляется, когда напряжения удовлетворяют критерию начала дилатансионного предразрушения (пределу упругости). Предполагается, что характерные смены типов, хрупкого разрушения, наблюдаемые при лабораторных испытаниях пород, сохраняются и внутри коры, на основании которых строятся соответствующие модели дефектности глубинных горизонтов земной коры. Определенным недостатком предположенной модели является требование наличия в земной коре сдвиговых напряжений, достигающих предела прочности пород. Это явление возможно, но не повсеместно и особенно маловероятно на древних кристаллических щитах, где, как известно, ЗНС отмечаются в большом количестве. Каждый из предложенных вариантов образования ЗНС в земной коре может существовать. Однако условия возникновения и механизмы их повсеместной реализации на глубине 5—15 км в различных геологических, тектонических и геотермических условиях труднообъяснимы.

На экспериментальных кривых $V_{P,S} = f(PT) = f(H)$ выявлены области инверсии скоростей. Суть экспериментальных исследований сво-

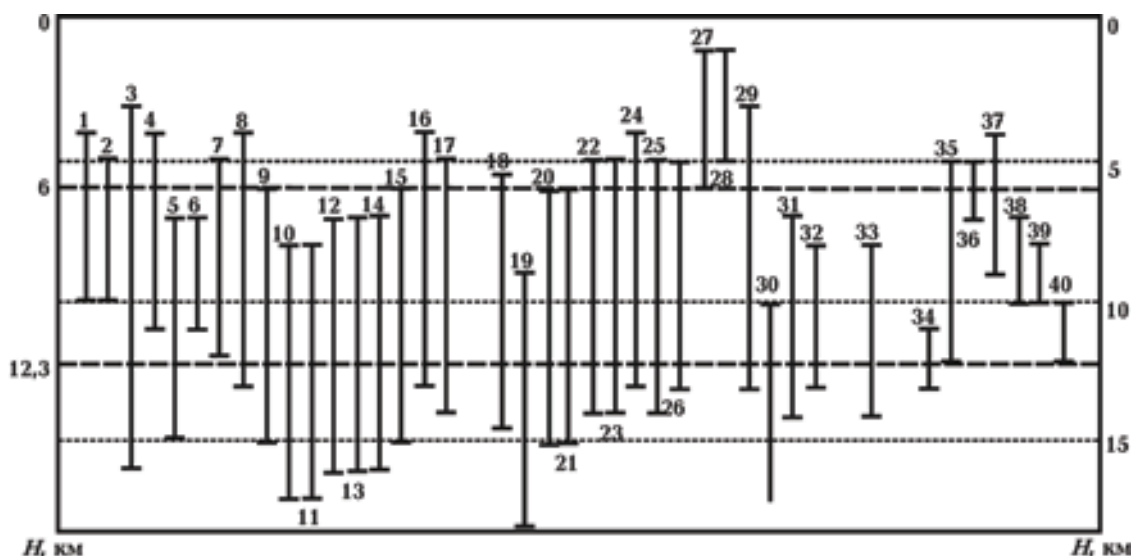


Рис. 1. Распределение волноводов в земной коре Украинского (1—17), Балтийского (18—32), Индийского (33), Канадского (34—40) щитов [Трипольский, Шаров, 2004]. $\Delta V_B = 0,1 \div 0,7$ км/с (0,1—0,22 км/с); $\Delta H_B = 3 \div 15$ км; $H_{\min} = 5 \div 12$ км.

дится к определению упругоплотностных характеристик пород в зависимости от программного воздействия PT -параметров, соответствующих конкретным значениям давления и температуры на различных глубинах литосферы [Лебедев, 1972; Лебедев, Корчин, 1980, 1986, 1988; Корчин, 2013 а, б]. Другими словами, с увеличением глубины термобарических параметров опыта, воздействующих на образец породы, после некоторого увеличения $V_{P, S}$ и ρ наблюдается область их уменьшения. Затем скорости и плотности вновь возрастают (рис. 2, а). Таким образом, на зависимости $V_{P, S} = f(PT) = f(H)$ образуется ЗНС [Корчин, 2013 а, б].

Эти экспериментальные зоны хорошо коррелируются по своей конфигурации и местоположению с упругими аномалиями, выявленными в земной коре в естественных условиях методом ГЗС (см. рис. 1).

Изменения $V_{P, S} = f(H)$ также могут быть рассчитаны по данным измерения серии изобар скоростей ($V_P = f(T)$ при $P = \text{const}$) и их изотерм ($V_P = f(P)$ при $T = \text{const}$) (см. рис. 2, б). Детальными исследованиями было показано, что обе используемые методики определения $V_P = f(H)$ дают идентичные результаты [Корчин, 2013 а].

Влияние PT -режимов на изменение упругих характеристик пород. Независимо от методик по нескольким PT -программам или расчетами по изобарам и изотермам скоростей экспериментально установлено, что существует пороговое значение изменения с глубиной температуры $\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)$, при котором возникают области аномального упругого состояния минерального вещества — зоны низких скоростей.

Изменение с глубиной V_P в породе постоянного минерального состава может быть рассчитано по соотношению $\frac{\partial V}{\partial H} = \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \frac{\partial P}{\partial H} + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \frac{\partial T}{\partial H}$. В земной коре ЗНС определяются условием $\frac{\partial V}{\partial H} < 0$. Поскольку $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \frac{\partial P}{\partial H} \times \frac{\partial T}{\partial H}$ положительны, а $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P < 0$, то для образования ЗНС необходимо выполнение условия для абсолютных величин:

$$\left| \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \frac{\partial P}{\partial H} \right| < \left| \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \frac{\partial T}{\partial H} \right|. \quad (1)$$

В земной коре в большинстве случаев изменение литостатического давления с глубиной можно считать постоянной величиной. Так, на

$$\text{глубине от 3 до 40 км для древних щитов} \left(\frac{\partial P}{\partial H}\right) \approx$$

$\approx 0,24 \div 0,32$ кбар/км. Градиент изменения температуры на этих глубинах варьирует в широких пределах — от 5 до 25 °С/км [Кутас, 1978; Корчин, 2013 а, б]. Исследования показали, что относительные изменения скоростей от давления при комнатных T характеризуются двумя участками: $P = 0 \div 2$ кбар — область максимального увеличения скорости, $P > 2$ кбар — минимального.

Как правило, изменение скорости от температуры при атмосферном давлении имеет три участка: $T < 80 \div 100$ °С (минимальные изменения), $T \approx 80 \div 250$ °С (максимальные изменения). Дальнейший нагрев в интервале ($T = 250 \div 600$ °С) приводит к небольшому уменьшению скорости. Относительные изменения скорости при компенсирующем постоянном давлении (изобары) и постоянной внешней температуре (изотермы) различаются по абсолютным величинам. В интервале 20—70 °С при $P < 0,7$ кбар изменения скоростей от температуры незначительны, т. е. с глубиной до 2—3 км скорости всегда интенсивно возрастают. Это обусловлено увеличением V_P за счет уплотнения породы. Интервал $T = 100 \div 250$ °С — область наиболее интенсивных изменений $V_P = f(T)$. Здесь возможно уменьшение скорости за счет разрушающего действия температуры в два раза при атмосферном давлении и порядка 10—20 % при компенсирующем давлении $P \approx 1 \div 4$ кбар. Именно в этом интервале давлений и температур ($P \approx 1,2 \div 3,5$ кбар; $T \approx 100 \div 250$ °С) наблюдаются наибольшие отрицательные изменения скорости распространения упругих волн в породах и обнаруживаются ЗНС. Эксперименталь-

ными исследованиями установлено: $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$ равно

$- 2,7 \pm 0,5$ ($P \approx 0,5$ кбар); $- 0,7 \pm 0,3$ ($P = 2$ кбар);

$- 0,33 \pm 0,1$ м/с · °С ($P = 5$ кбар); $\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ равно

$0,8 \pm 0,3$ ($P \approx 0 \div 2$ кбар, $T \approx 20 \div 80$ °С); $0,01 \pm 0,005$ (при $P \approx 2 \div 5$ кбар, $T \approx 20 \div 80$ °С); $0,04 \pm 0,01$ ($P \approx 2 \div 5$ кбар, $T \approx 265$ °С). На основании этих данных и опытов, выполненных по программам с низко- и высокотемпературным режимами, а также расчетов установлено, что в случае реализации низкотемпературного режима опы-

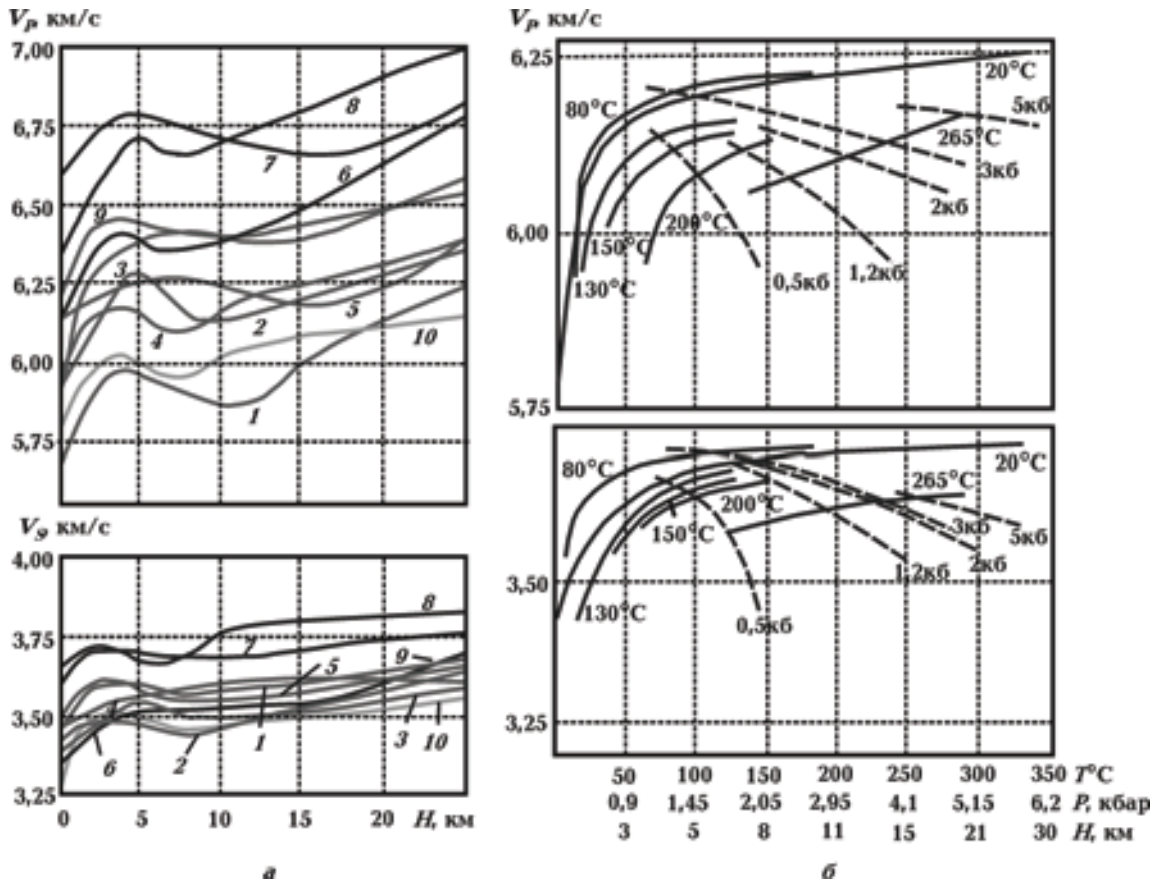


Рис. 2. Изменение $V_{P,S}$ с глубиной (а): 1—5 — граниты (1 — равномернозернистые, 2 — порфировидные, 3 — рапакиви, 4 — плагиограниты, 5 — трахитоидные), 6 — средние породы, 7 — основные породы, 8 — ультраосновные породы, 9 — чарнокитоиды, 10 — гнейсы; б — изобары и изотермы изменения скорости $V_{P,S}$ в граните.

тов, при $\frac{\partial T}{\partial H} < 9 \div 11 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{км}$, зоны инверсии скоростей на зависимостях $V_P = f(PT) = f(H)$ не проявляются. В этом случае не выполняется условие

$$\left| \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \frac{\partial P}{\partial H} \right| < \left| \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \frac{\partial T}{\partial H} \right|.$$

Если градиент $\frac{\partial T}{\partial H} > 15 \div 20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{км}$, то в интервале давлений 1,8—3,5 кбар на зависимостях $V_P = f(PT)$ четко регистрируются ЗНС. Уменьшение скоростей в этих зонах для различных образцов пород варьируют от – 10 до – 250 м/с (рис. 3).

Мощность слоев с пониженной скоростью от 2 до 20 км (60 % в интервале 6—12 км). Как правило, глубины минимальных значений V_P расположены в интервале суперпозиции давлений и температур, соответствующих 6—21 км

(см. рис. 2, 3). В табл. 1 представлены средние значения параметров, характеризующих ЗНС для изученных пород.

Как видно (см. рис. 2, 3, табл. 1), конфигурации ЗНС, полученные в ходе экспериментов (глубина залегания, мощность, занижение скорости), подобны обнаруженным в ходе глубинного сейсмического зондирования земной коры (см. рис. 1). На кривых $V_P = f(PT) = f(H)$ можно выделить три участка (см. рис. 3, а). Первый участок приращения соответствует начальному интервалу глубин 0—5 км, где скорости V_P, V_S резко возрастают. Здесь с глубиной происходит интенсивное уплотнение пород литостатическим давлением, закрывается большинство открытых микроскопических трещин и некоторых пор в породе. Особое внимание было уделено исследованию зависимости градиентов упругих скоростей от минерального состава в зоне инверсии $V_P = f(PT) = f(H)$.

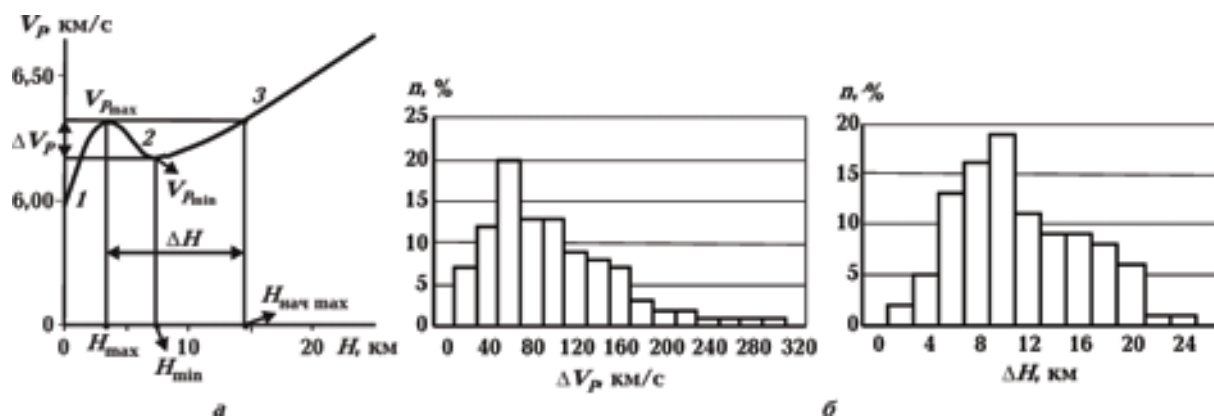


Рис. 3. Основные параметры зоны инверсии (а); гистограммы распределения ΔV_p (уменьшение скорости в зоне) и ΔH (глубина залегания минимума V_p в зоне низких скоростей) (б): 1 — $(\partial V_{p,s} / \partial H)_1$, 2 — $(\partial V_{p,s} / \partial H)_{нс}$, 3 — $(\partial V_{p,s} / \partial H)_2$.

Влияние минерального состава пород на изменение их упругих характеристик. Среди изученных минеральных ассоциаций поро-

ды с повышенным содержанием кварца дают наибольшее количество ЗНС. Самые высокие значения градиентов понижения скорости в

Т а б л и ц а 1. Средние значения параметров, характеризующих зону низких сейсмических скоростей

Порода	Параметры								
	ΔV_p , км/с	ΔH , км/с	ΔV_{p0} , км/с	V_{pmax}	H_{max}	V_{pmin}	H_{min}	$\left(\frac{\partial V_p}{\partial H}\right)_{нс}$	$\left(\frac{\partial V_p}{\partial H}\right)_2$
Граниты равномерно-зернистые	0,11	9	5,6	6,08	4,46	5,97	10,5	-0,022	0,023
Граниты рапакиви	0,11	10,6	5,83	6,36	7,05	6,25	13,7	-0,029	0,055
Граниты порфиридные	0,15	12,1	5,91	6,26	6,21	6,11	13,21	-0,022	0,030
Плагииграниты	0,08	10,5	5,92	6,16	4,79	6,13	6,36	-0,018	0,012
Граниты трахитоидные	0,08	13,8	6,07	6,52	5,67	6,41	15,77	-0,010	0,013
Диориты	0,07	8,5	6,16	6,41	5,75	6,34	9,75	-0,016	0,015
Лабрадориты	0,1	11,1	6,53	6,69	4,63	6,59	10,75	-0,021	0,022
Габбро	0,13	11,7	6,76	6,76	5,58	6,63	11,92	-0,018	0,022
Пироксениты	0,09	9,5	6,33	6,41	5,75	6,34	9,75	-0,018	0,020
Чарнокитоиды	0,11	10,2	6,27	6,56	3,86	6,45	9,33	-0,014	0,028
Гнейсы биотитовые	0,08	9,4	5,51	5,68	4,39	5,61	8,88	-0,027	0,033
Гнейсы Rх/Аf	0,09	10,3	6,09	6,15	7,84	6,06	13,81	-0,018	0,019

Примечание: ΔV_p — уменьшение скорости в ЗНС; ΔH — мощность зоны, ΔV_{p0} — скорость при атмосферных условиях V_{pmax} , H_{max} — первый максимум и его глубина; V_{pmin} , H_{min} — минимальная скорость в зоне и ее глубина; $(\partial V_p / \partial H)_{нс}$ — градиент изменения скорости в ЗНС; $(\partial V_p / \partial H)_2$ — интенсивность роста скорости после ЗНС.

ЗНС наблюдаются у порфириовидных гранитов и гранитов рапакиви, а также у биотитовых гнейсов, которые имеют низкие начальные значения упругих скоростей. Как правило, чем выше начальные скорости у пород, тем больше ΔV_P и ΔH . Это свидетельствует о том, что чем меньше изменена структура породы, тем более она подвержена преобразованиям в условиях программных высоких давлений и температур в зоне инверсии в лабораторных условиях опытов.

Отмечаются высокие парные коэффициенты корреляции минимальных значений скоростей упругих волн в зоне инверсии ($V_{P\min}$) с содержанием главных породообразующих минералов во всех исследуемых группах пород, а также минимальных значений глубины ЗНС (H_{\min}) с процентным содержанием кварца. Можно предположить, что в микродеформационных процессах и разуплотнении минеральной среды в ЗНС наиболее активны зерна кварца. Последние, очевидно, способствуют хрупким сдвиговым нарушениям отдельных участков соседних минералов в сложнопластичном состоянии образца породы при определенных PT -воздействиях [Korchin, 2006 а, б, 2010; Корчин, 2007, 2013 а, б; Корчин и др., 2013].

Аналогичный результат показал анализ множественных корреляционных зависимостей ΔV_P и ΔH от процентного содержания главных породообразующих минералов. Основными минералами, влияющими на параметры зоны для гранитоидов и гнейсов, являются кварц и плагиоклаз. Увеличение содержания кварца и плагиоклаза в породах кислого состава и в гнейсах ведет к уменьшению значений ΔV_P и ΔH . Увеличение процентного содержания калиевого полевого шпата уменьшает или увеличивает эти параметры.

Изменения скорости на участке $H > 18$ км наиболее зависимы по данным анализа парных корреляций от процентного содержания плагиоклаза и, в наименьшей степени, от процентного содержания биотита и пироксена в породе. Для большинства групп исследуемых пород свойственно правило: чем ниже скорости упругих волн в ЗНС, тем больше их градиенты с увеличением глубин. Причем градиенты изменения скоростей V_P намного больше чем V_S .

Анализ коэффициентов множественной корреляции между всеми различными возможными сочетаниями главных породообразующих минералов и скоростями показал, что для всех групп пород характерна тенденция к снижению зависимостей упругих параметров от процентного содержания главных породообразующих

минералов с глубиной [Корчин 2013 а, б]. На первом участке приращения упругих скоростей с глубиной значения множественных коэффициентов корреляции растут. В зонах инверсии, соответствующих глубинам 3—16 км, значения множественных коэффициентов корреляции падают, а вслед за ЗНС вновь растут, однако оставаясь меньше, чем на первом участке малых глубин.

Такие закономерности свидетельствуют о том, что с глубиной влияние PT -параметров (в пределах земной коры) не способствует увеличению дифференциации пород по минеральному составу и упругим параметрам. В ЗНС влияние минерального состава на упругие параметры пород невысокое и значительно меньше, чем структурные преобразования пород под воздействием давлений и температур.

Природа зон низких сейсмических скоростей — термобарическое разуплотнение пород. Обобщая результаты комплексного структурного исследования различных пород Украинского щита при высоких давлениях и температуре оптическими, рентгеноструктурными, электронно-микроскопическими методами, анализируя материалы изучения упругих характеристик пород (табл. 2), можно сделать ряд предположений о природе упругой вертикальной зональности минерального вещества отдельных горизонтов земной коры [Корчин, 2007, 2013 а, б].

Прежде всего, в зоне низких скоростей ($H = 3 \div 15$ км, $P = 1,5 \div 3$ кбар, $T = 150 \div 250$ °С) уменьшаются упругие константы пород (E, G, K), значительно увеличивается двойникование минералов, расширяются межзерновые границы за счет их милонитизации, увеличивается количество магистральных микротрещин. Происходит растрескивание и разрушение газовой-жидкой включений. Уменьшаются блоки мозаики отдельных зерен минералов. Увеличивается плотность дислокаций в блоках и уменьшается в межзерновых границах. Увеличивается относительная деформация зерен, их двойникование. Увеличиваются дефекты упаковки минералов и количество центров генерации дислокаций, которые перемещаются в основном за счет трансляционного скольжения. Совокупность обнаруженных микроструктурных преобразований породы свидетельствует о низко-температурном упругом упрочнении и хрупком разрушении минерального вещества [Корчин, 2007, 2013а].

Комплекс упругих и структурных изменений пород, начиная от термодинамических условий на глубине от 3—5 до 12—15 км, свидетельствует о свойствах пород, характерных их

Т а б л и ц а 2. Микроструктурные изменения горных пород при различных давлениях и температурах

Микроструктурные характеристики и свойства	Параметры PT -воздействия и обнаруженные изменения	
	ЗНС $P = 2 \div 3$ кбар, $T = 160 \div 220$ °С, $H = 3 \div 15$ км	Область возрастания скорости $P = 5,5 \div 6,5$ кбар, $T = 300 \div 350$ °С, $H > 10 \div 15$ км
$V_p, V_s, E, G, \mu, K, \rho, 1/\beta$	Уменьшаются	Увеличиваются
Двойникование и мелонизация	Значительные	Малы, уменьшаются
Расширение межзерновых границ	Значительно увеличилось	Уменьшилось, границы уплотнились
Магистральные микротрещины	Увеличились	Уменьшились, отсутствуют
Изменение газовой-жидких включений	Растрескивание, разрушение	Расшнурование, уменьшение в объеме, локализация
Оптическая анизотропия	Увеличилась	Уменьшилась
Поляризационная оптическая неоднородность	Увеличилась	Уменьшилась
Искривление пластин биотита, двойниковых полос плагиоклаза	Нет	Выявлено
Переориентация зерен кварца, биотита, плагиоклаза	Нет	Выявлена
Линии скольжения биотита	Выявлены	Уменьшение числа линий
Изменение формы зерен кварца	Растрескивание	Разворот, перекристаллизация
Блоки мозаики	Уменьшились	Увеличились
Плотность дислокаций в блоках	Увеличилась	Уменьшилась
Плотность дислокаций в межзерновых границах	Уменьшилась	Увеличилась
Относительная деформация зерен	Увеличилась	Уменьшилась, изменился знак
Дефекты упаковки, двойники	Увеличились	Уменьшились
Плотность дислокаций зерен	Увеличилась	Уменьшилась
Характер дислокационного поля, динамика	Увеличение центров генерации, трансляционное скольжение	Переползание, аннигиляция, локализация, увеличение дислокационных полос, консервативное скольжение
Характер деформации	Низкотемпературное упругое упрочнение, хрупкое разрушение	Упругое и пластичное высокотемпературное уплотнение

Примечание: E — модуль Юнга, G — модуль сдвига, μ — коэффициент Пуассона, K — модуль всестороннего сжатия, ρ — плотность, $1/\beta$ — обратная сжимаемость.

катакластическому преобразованию. В данном интервале PT -изменений происходит разуплотнение минеральной среды — явление микро-

дилатансии. Основным механизмом этого процесса — совместное действие развивающихся в среде неравномерно распределяющихся неод-

нородных напряжений по объему образца, иногда достигающих в локальных контактах значений больше предела прочности отдельных минералов, приводящих к хрупким на микроуровне разрушениям среды. Такому разуплотнению способствуют разноориентированные анизотропные коэффициенты линейного расширения отдельных минералов, эффект разрушения газозо-жидких включений, миграция свободной воды и газа по микротрещинам породы.

Полагаем, что наличие ЗНС в земной коре является объективной реальностью (как результат структурных преобразований пород в условиях противоборства давлений и температур, характерных для определенных глубин литосферы). Они возникают в тех случаях, когда градиент температуры на соответствующих глубинах превосходит определенный порог, а давление не способно компенсировать нарушение минеральной среды, вызванное действием температуры.

При дальнейшем увеличении глубины "погружения" породы, т.е. программного увеличения действия на образец PT -параметров ($H > 25$ км, $P > 5,5$ кбар, $T > 300$ °С), наблюдается интенсивное увеличение упругих параметров породы.

После уплотнения породы с глубиной ($H > 10 \div 15$ км) включаются механизмы, характерные пластическим деформациям среды. За счет вещественных и структурных (на уровне элементарных дефектов) перестроек происходит совершенствование породы, что улучшает ее упругие характеристики, возрастают плотность и скорости распространения упругих волн в них. С некоторыми допущениями, пользуясь геологической терминологией, в интервале глубин 20—40 км наблюдается процесс регионального низкотемпературного дислокационного метаморфизма.

Влияние воздействий давлений и температур на плотность пород. Дополняют и расширяют наши представления о природе термобарических зон инверсии скорости (ЗНС) экспериментальные исследования изменения плотности горных пород в программных PT -условиях опытов, соответствующих распределению этих параметров с глубиной конкретных геологических провинций.

По материалам широкого комплекса экспериментальных исследований горных пород и минералов в различных PT -условиях установлено, что в ЗНС (глубина $H = 5 \div 15$ км) увеличиваются относительная деформация зерен и их двойникование. Увеличивается плотность

дислокаций в блоках и уменьшается в межзерновых границах. Увеличиваются дефекты упаковки минералов. При этом расширяются межзерновые границы за счет их милонитизации, увеличивается количество магистральных микротрещин. Происходит разгерметизация или вскрытие газозо-жидких включений в минералах при нагревании вследствие избыточного внутреннего давления. Кроме того, оказалось, что породы здесь характеризуются пониженной плотностью (показано экспериментально впервые) (рис. 4) [Корчин, 2012, 2013 а].

Данные о изменении плотности с глубиной были получены в ходе опытов по изучению декремента объема пород при программных PT -воздействиях и ультразвуковым определениям сжимаемости пород.

Как показали эксперименты, плотностные характеристики горных пород подобно упругим с глубиной изменяются по нелинейным законам. На зависимостях $\rho = f(PT) = f(H)$ проявляются максимумы и минимумы, т. е. при глубинных одновременно действующих на минеральное вещество давлениях и температурах образуются зоны инверсии плотности. Сделанные предположения о механизме возникновения ЗНС подтверждаются данными изучения плотности пород под влиянием программного воздействия P и T . Как и ожидалось, при P и T , соответствующих глубинам ЗНС, плотности также уменьшаются, а иногда соотношение $d\rho / dH$ приобретает отрицательные значения, подтверждая тем самым интенсивное разуплотнение пород в этих горизонтах, образуя области пониженной плотности в коре. Исследования показали, что при термодинамических параметрах, соответствующих глубине 5—15 км, градиент роста плотности пород падает до нуля или становится отрицательным ($\Delta\rho$ иногда достигает $0,01\text{--}0,03$ г/см³) (см. рис. 4). Дополнительными исследованиями установлено, что зоны инверсии плотности слабо зависят от минерального состава слагающих кору минерального вещества. Очевидно, на изменение плотности пород основное влияние оказывают их структурные преобразования и химический состав.

Как и ЗНС, горизонты пониженной плотности весьма чувствительны к температурным режимам земной коры. С повышением глубинного теплового потока снижается плотность пород, активизируется способность пород к разуплотнению, повышается их проницаемость и гигроскопичность, т. е. активизируется процесс перемещения флюидов, и, как следствие, происходит метаморфическое преобразование по-

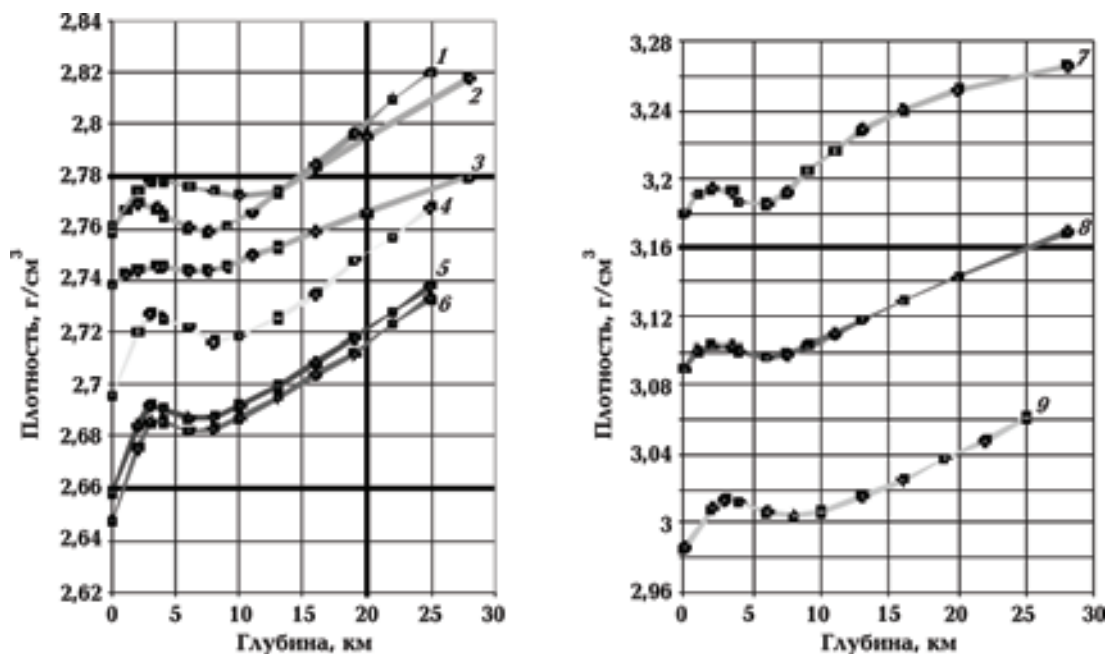


Рис. 4. Графики зависимости $\rho = f(PT) / f(H)$ для отдельных пород: 1 — лабрадориты, 2 — чарнокиты, эндрбиты, 3 — анортозиты, 4 — гнейсы биотитовые, 5 — граниты и мигматиты, 6 — граниты порфириовидные и рапакививидные, 7 — пироксениты, 8 — габбро, 9 — гнейсы амфиболитовые.

род. Другими словами, эти зоны пониженной плотности и скорости должны быть наиболее активными горизонтами современных геолого-геофизических преобразований минеральной среды земной коры [Корчин, 2012, 2013 а, б].

Подобие данных экспериментальных исследований и материалов натуральных наблюдений. Сопоставляя данные ГСЗ и эксперимента, можно сделать ряд предположений о физической природе упругой зональности минерального вещества верхних горизонтов земной коры. Подобное суждение является результатом комплексного исследования различных пород, при высоких давлениях и температурах [Лебедев, 1972; Лебедев, Корчин, 1980, 1986, 1988; Корчин, 2013 а, б].

Большой объем экспериментальных исследований горных пород при различных термобарических параметрах (в том числе изменяющихся по программам) был бы бесполезен, если бы он был не сопоставим с материалами глубинных геофизических наблюдений. Правомочность такого сопоставления подтверждается соответствующими критериями подобия, которые оправдывают сравнительный анализ и сопоставление данных геофизических наблюдений и материалов лабораторного изучения физических параметров пород.

Модельные и природные процессы или явления считаются подобными, если определяющие их критерии численно равны. Теория размерности и подобия позволяет использовать эффективные методы поиска необходимых при этом соотношений.

Критерии подобия (Π) — это безразмерные комплексы, состоящие из величин, которые характеризуют данное явление или процесс. Для нахождения безразмерных комплексов применительно к рассматриваемой проблеме использовался метод анализа размерностей. С этой целью был осуществлен выбор величин, наиболее полно определяющих скорость распространения упругой волны в минеральном веществе. Известно, что скорость является характеристикой, отражающей физическое состояние вещества в различных термобарических условиях. Следовательно, если считать, что последнее обусловлено в основном давлением (P), температурой (T), плотностью (ρ), объемом (U), удельной теплоемкостью (C_{yA}) и коэффициентом Пуассона (σ), то скорость упругой волны (V) находится в функциональной зависимости от них:

$$V = f(P, T, \rho, U, C_{yA}, \sigma). \quad (2)$$

Поскольку объекты исследований имеют ко-

нечные размеры и находятся в изменяющихся термобарических условиях, целесообразно рассматривать зависимости V от изменений PT -режимов с глубиной. Заменяя T и P на их градиенты ($\text{grad } T$ и $\text{grad } P$), получим следующие размерности этих величины: $[V] = \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; $[\text{grad } P] = \text{кг} \cdot \text{г}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}$; $[\text{grad } T] = ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^{-1}$; $[\rho] = \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $[z] = \text{г}$; $[C_{\text{уд}}] = \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2} (^\circ\text{C})^{-1}$; $[\sigma]$ — безразмерный.

Решая составленную из них матрицу размерностей, получим следующие критерии подобия:

$$\Pi_1 = \frac{\text{grad } P \cdot z}{V^2 \cdot \rho}, \quad (3)$$

$$\Pi_2 = \frac{\text{grad } T \cdot z \cdot C_{\text{уд}}}{V_2}, \quad (4)$$

Π_1 характеризует воздействие давления на скорость упругой волны исследуемого объекта в границах мощности z , Π_2 — влияние температуры. Следовательно, если модель и натуральное представление состоят из одного и того же вещества, а $P_{\text{м}} = P_{\text{н}}$ и $C_{\text{уд м}} = C_{\text{уд н}}$, то равенство скорости в натуральных и модельных обстановках будет иметь место при выполнении следующего условия:

$$\text{grad } P \cdot z = \text{inv}, \quad \text{grad } T \cdot z = \text{inv}. \quad (5)$$

Следовательно, условия равенства средних значений P и T в модели и натурной обстановке достаточно, чтобы скорость распространения упругой волны в них могла быть сравнима. Из неизменности скорости в модели и натуре должна вытекать неизменность отношения скорости распространения продольной волны к поперечной ($\Pi_3 = V_P / V_S$). Известное среднее значение этого параметра для земной коры составляет около $\sqrt{3}$. Среднее значение отношения скоростей, определенных в лаборатории, порядка 1,77 (в доверительном интервале 0,95 не выходит за пределы 1,7 ... 1,9, а именно $V_P / V_S = 1,8 \pm 0,1$) [Корчин, 2013 б]. Итак, подтверждается предположение, что критерий Π_3 — величина инвариантная, т. е. численно одинаковая в натуре и моделях. Таким образом, скорость распространения упругой волны в соответствующих модельных режимах не должна отличаться от наблюдаемой в естественных условиях при идентичности минерального состава объектов исследования X_1 . Поэтому при моделировании достаточно выполнения равенства средних значений давлений и температур в лабораторных и естественных условиях. Это позволяет принимать масштабные коэффициенты значений скорости, давления и темпера-

туры равными единице. Уравнения, описывающие связи величин V_P , X_1 , T и P , получаемые по материалам экспериментальных исследований, будут инвариантны, а значит, могут быть использованы без изменений при моделировании реальных сред на различных глубинах литосферы.

Основой разработанного термобарического петроскоростного моделирования является сопоставимость данных о скоростях распространения упругих волн в литосфере, полученных методом ГСЗ, и результатов экспериментальных измерений в образцах различных пород при высоких давлениях и температурах [Корчин, 2010 а, б; 2013 а, б]. Это дает право предполагать, что, вероятнее всего, в земной коре на указанных глубинах рассматриваемые ЗНС имеют термодинамическую природу.

Динамика ЗНС в земной коре. Экспериментально было подтверждено, что существует тесная связь в различных PT -условиях между теплопроводностью пород и их упругими характеристиками. Если предположить, что в минеральном веществе земной коры передача тепла осуществляется в основном фононной теплопроводностью, то ее величину можно оценить, воспользовавшись простыми уравнениями теплоемкости теории Дебая [Алерс, 1968; Корчин, 2011 б, в, 2013 а]. В результате несложных преобразований [Корчин, 2013 а] было получено уравнение для фононной теплопроводности:

$$\lambda_\phi = \frac{1}{3} C_{\text{уд}} \rho V_\phi l_\phi = \frac{\delta_0 \beta V_{\text{ср}} \rho^{-1/3}}{a_0 \gamma^2 \mu^{2/3}} \frac{\theta}{T} \approx AV_m \frac{\theta}{T}, \quad (6)$$

где $C_{\text{уд}}$ — удельная теплоемкость, ρ — плотность, $V_\phi = V_m$ — средняя скорость пробега фононов, равная средней скорости распространения упругой волны — $(1/V_P^3 + 2/V_S^3)^{-1/3}$, l_ϕ — средняя длина свободного пробега фононов, δ_0 — средняя константа решетки, β — сжимаемость, μ — средний молекулярный вес, γ — параметр Грюнайзена $\left(\gamma = \frac{d \ln \theta}{d \ln p} \right)$; T — температура, θ — температура Дебая, A — постоянный коэффициент, включающий постоянные параметры, независимые от PT -условий.

Из приведенного соотношения следует, что изменение теплопроводности в земной коре в каком-то интервале глубин прямо пропорцио-

нально изменению упругоплотностных характеристик минеральной среды и обратно пропорционально температуре. Расчетами и экспериментальными исследованиям $V_p = f(PT)$, $\lambda = f(PT)$ показано [Корчин, 2011 б, 2013 а], что теплопроводность пород в земной коре изменяется подобно $V_p = f(H)$. На зависимости $\lambda = f(H)$ выделяются области минимальных значений, совпадающие по расположению с ЗНС.

Таким образом, ЗНС в земной коре характеризуются пониженными значениями λ и служат отражающими горизонтами для теплового потока, источником которого являются термоактивные процессы на больших глубинах.

По классическим законам термодинамики и теплофизики [Нашекин, 1969], наличие слоя с пониженной теплопроводностью на пути распространения тепловой энергии приводит к повышению температуры на нижнем участке слоя и к понижению ее на верхнем (рис. 5).

При этом нарушается равновесное PT -условие существования ЗНС. С понижением температуры в верхней области зоны нарушается термобарическое условие (1). Состояние пород верхнего слоя выравнивается с состоянием вышележащих пород, и верхняя кромка зоны опускается вниз. Граница T_{01} опускается на T'_2 . Одновременно, пропорционально разнице теплопроводности минеральной среды зоны, в нижней части подстилающих ее пород происходит перегрев подошвы зоны, что приводит к нарушению опять же условия (1) и нижняя кромка зоны с T_{02} опускается вниз на уровень T'_4 . Более высокое давление останав-

ливает увеличение зоны за счет компенсации термических структурных нарушений пород давлением.

Таким образом, зона изменяет свою конфигурацию — ее мощность может увеличиваться (с увеличением интенсивности глубинного теплового потока) или она исчезает (с понижением поступления достаточного тепла с глубины). Подобная неустойчивость, нестабильность термодинамических ЗНС обуславливает их эпизодичность проявления в земной коре, а также их миграцию по глубине и горизонтали в зависимости от флуктуации температурного поля в глубинных горизонтах земли [Трипольский, Шаров, 2004; Корчин, 2013 а, б].

В земной коре Украинского щита по материалам ГСЗ выделяется несколько участков с явно выраженными ЗНС. Для этих участков выполнено петрофизическое термобарическое моделирование, в основу которого положено сопоставление данных ГСЗ с учетом геолого-геофизической обстановки изучаемой площади и экспериментальных исследований упругих характеристик горных пород в PT -условиях, соответствующих глубинным термобарическим параметрам изучаемого района [Корчин, 2011 а, б; Корчин и др., 2013] (рис. 6).

Термобарическое петрофизическое моделирование участков литосферы Украинского щита с коровыми ЗНС показало, что зоны в коре слабо зависят от минерального состава пород на соответствующих глубинах и в первую очередь связаны с геотермической обстановкой на соответствующих глубинах.

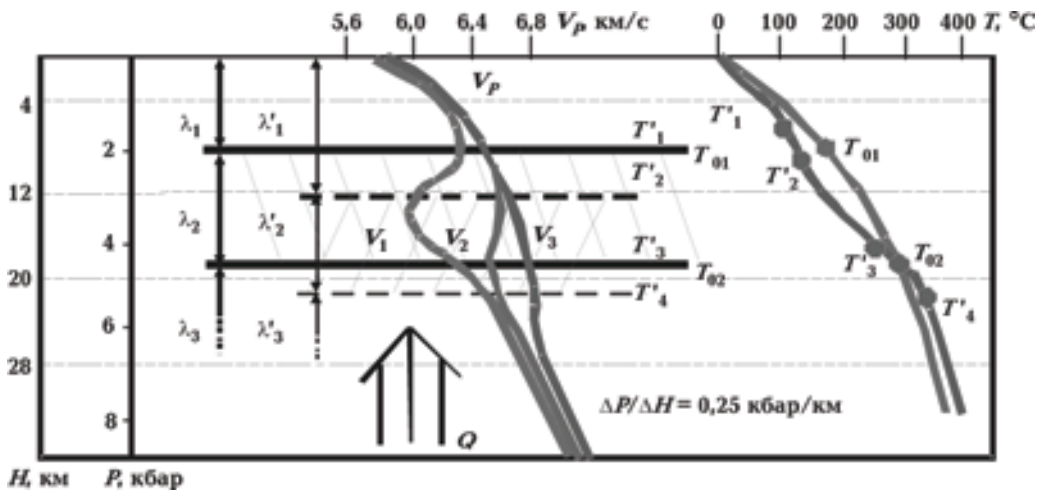


Рис. 5. Динамика изменения параметров ЗНС в связи с изменением глубинного теплового потока (Q).

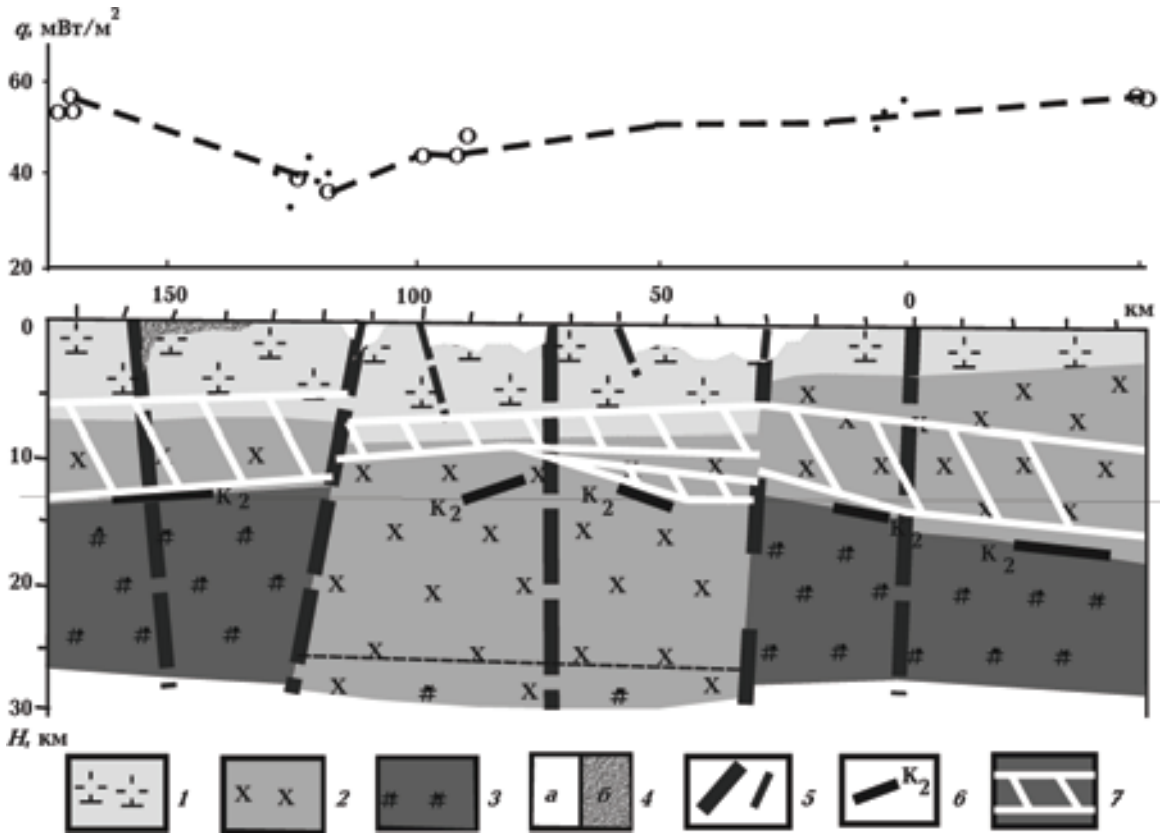


Рис. 6. Фрагмент схематического разреза вещественного состава земной коры участка геотраверса IV: 1 — плагиограниты, 2 — диориты, 3 — эндербиты, 4 — осадочно-вулканогенные породы зеленокаменных структур (а) и гранитоиды кировоградско-житомирского комплекса (б), 5 — зоны разломов, 6 — граница K_2 , 7 — зона низких скоростей, q — тепловой поток вдоль профиля.

В зависимости от величины теплового потока (суммарного ТП) изменяются температуры в литосфере, а также физические свойства слагающих ее пород [Кутас, 1978]. Так, на глубине 25 км рассчитаны следующие зависимости T от ТП: $T = 250^\circ\text{C}$ при ТП = 30 мВт/м²; $T \approx 300^\circ\text{C}$ при ТП = 40; $T \approx 500^\circ\text{C}$ при ТП = 60 мВт/м². Таким образом, поскольку тепловые потоки на исследуемом участке Украинского щита варьируют от 30 до 55 мВт/м² (см. рис. 6), различные блоки вдоль профиля имеют различные температурные градиенты с глубиной, а следовательно, характеризуются различной конфигурацией ЗНС. Действительно, как видно на приведенной модели (см. рис. 6), ЗНС более значительны и уверенно регистрируются на западном и восточном участках, где ТП $\approx 50 \div 60$ мВт/м², а $T_{25} = 350 \div 425^\circ\text{C}$ ($\partial T/\partial H \approx 14 \div 17^\circ\text{C}/\text{км}$). В центральном блоке (ПК 110—70), где ТП $\approx 35 \div 45$ мВт/м², а $T = 270 \div 305^\circ\text{C}$ ($\partial T/\partial H < 12^\circ\text{C}/\text{км}$), ЗНС менее выражены, маломощны по глубине, группируются в форме отдельных линз. В

связи с более низким ТП и неоднородностью теплового поля, в центральном блоке (ПК 75—30) можно выделить две ЗНС: первая — на глубине 6—9 км в гранитах ($\Delta V \approx 0,15$ км/с), вторая — на глубине 10—12 км в диоритах ($\Delta V = 0,03$ км/с).

Совместный анализ материалов ГСЗ, геотермического и петроструктурного моделирования показал, что участки земной коры с более высокими температурными градиентами имеют более сложный характер изменения сейсмических скоростей с глубиной с проявлением интенсивных ЗНС [Корчин, 2011 б; Корчин и др., 2013]. В более "холодных" участках коры ЗНС незначительны или вообще отсутствуют. Кроме того, доказано, что вариации минерального состава пород на глубине 5—20 км мало влияют на положение ЗНС и их интенсивность.

Зоны низких скоростей в земной коре — области повышенной пористости минерального вещества и активного преобразования газовой-жидких включений. Физические ха-

рактические различные типы кристаллических (изверженных и метаморфических) пород в значительной степени зависят от их трещиноватости и пористости, состояния межзерновых границ, хотя в первую очередь обусловлены составом и структурно-текстурными особенностями минерального субстрата. Наличие в породах различного вида пор и микротрещин определяется условиями их формирования, последующими процессами преобразования. Интерес к исследованиям порового пространства в кристаллических породах значительно возрос в связи с изучением миграции газовой-жидких фракций в них, в частности углеводородов на различных глубинах литосферы [Гегузин, Кривоглаз, 1971; Трипольский, Шаров, 2004; Корчин, 2012, 2013 а, б, 2014; Korchin, 2006 а, б]. Всю гамму закономерных и случайных причин, влияющих на образование пор и микротрещин, выявить практически невозможно. Однако определена тенденция, что у петрографически сходных групп пород увеличение пористости и микротрещиноватости ведет к уменьшению скорости распространения в них упругих волн. При исследовании упругих параметров кристаллических пород в различных термодинамических условиях установлена степень влияния на скорости изменения объема и характера нарушения сплошности минеральной среды.

Изучая связь порового пространства со скоростью распространения продольных упругих волн при высоких давлениях и температурах в образцах гранитов Украинского щита, стало возможным более полно охарактеризовать изменение пористости и трещиноватости пород в зависимости от воздействия P и T на различных глубинах, а также объяснить некоторые коровые аномалии разуплотнения пород, которые, в свою очередь, могут являться проводниками миграции и локализации углеводородов глубинного происхождения. Выявлена четкая нелинейная зависимость скорости от пористости при атмосферном давлении для трех групп гранитов, различающихся по величине зерен породообразующих минералов. Градиенты изменения $V_P = f(n)$ возрастают с увеличением размеров зерен (рис. 7).

Пористость и структурно-текстурные особенности гранитов являются основными факторами, обуславливающими изменение скорости распространения продольных упругих волн при давлениях до 2—3,5 кбар в образцах одинакового минерального состава (рис. 7, а). Градиенты изменения $V_P = f(P)$ более высокие у

гранитов с большими размерами зерен породообразующих минералов. Значения скоростей в почти "беспоровых" гранитах хорошо согласуются с экстраполированными линейными участками зависимости $V_P = f(P)$ до пересечения с осью ординат (V_0) (рис. 7, б). Криволинейные участки графиков $V_P = f(P)$ характеризуют увеличение скорости главным образом за счет закрытия различных видов пор и микротрещин (V_{Pn}), а также в связи с изменением упругих свойств породообразующих минералов ($V_{Pn=0}$). На основании более 100 зависимостей $V_P = f(P)$ для пород с различной пористостью получено уравнение $V_P = V_0 + (0,6\rho_0 + 0,09n_0 - 1,5) \lg P$, с достаточной степенью надежности оценивающее скорость распространения продольной упругой волны в образцах гранитов при высоких гидростатических давлениях (до 5000 кг/см²) по данным значений скорости (V_P), плотности (ρ_0) и пористости (n_0), измеренных в нормальных условиях. Средние значения давлений, при которых практически отсутствует влияние порового пространства на изменение скорости, составляют для мелко-, средне- и крупнозернистых гранитов соответственно 2,6 (2,0—2,8), 2,2 (1,8—2,6) и 1,9 (1,8—2,4) кбар (рис. 7, в).

Графики $\frac{n_0 - n_P}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} = f(P)$, где $n = n_0 \times \left(1 - \sqrt{\frac{V_P - DP - V_0}{V_0 - V_0}} \right)$, характеризуют от-

носительное изменение порового пространства (в %) от давления в гранитах (см. рис. 7). D — относительное изменение скорости от давления на линейном участке за счет упругой деформации породообразующих минералов. Приведенное соотношение позволяет по данным измерениям скорости распространения упругих волн в горных породах на различных глубинах совместно с изменением плотности пород в различных PT -условиях оценить изменения величины порового пространства пород в зависимости от приложенного давления и температуры (от глубины) (см. рис. 2, 4, 7).

На основании вышеизложенного, графическим путем и теоретическими расчетами показано, что пористость горных пород до глубины 3—5 км уменьшается на 30—50 %.

В зоне низких скоростей (4—15 км) (области разуплотнения пород, разрыхления межзерновых границ) наблюдается увеличение пористости (рис. 8). По уменьшению скорости распространения упругих волн и изменению

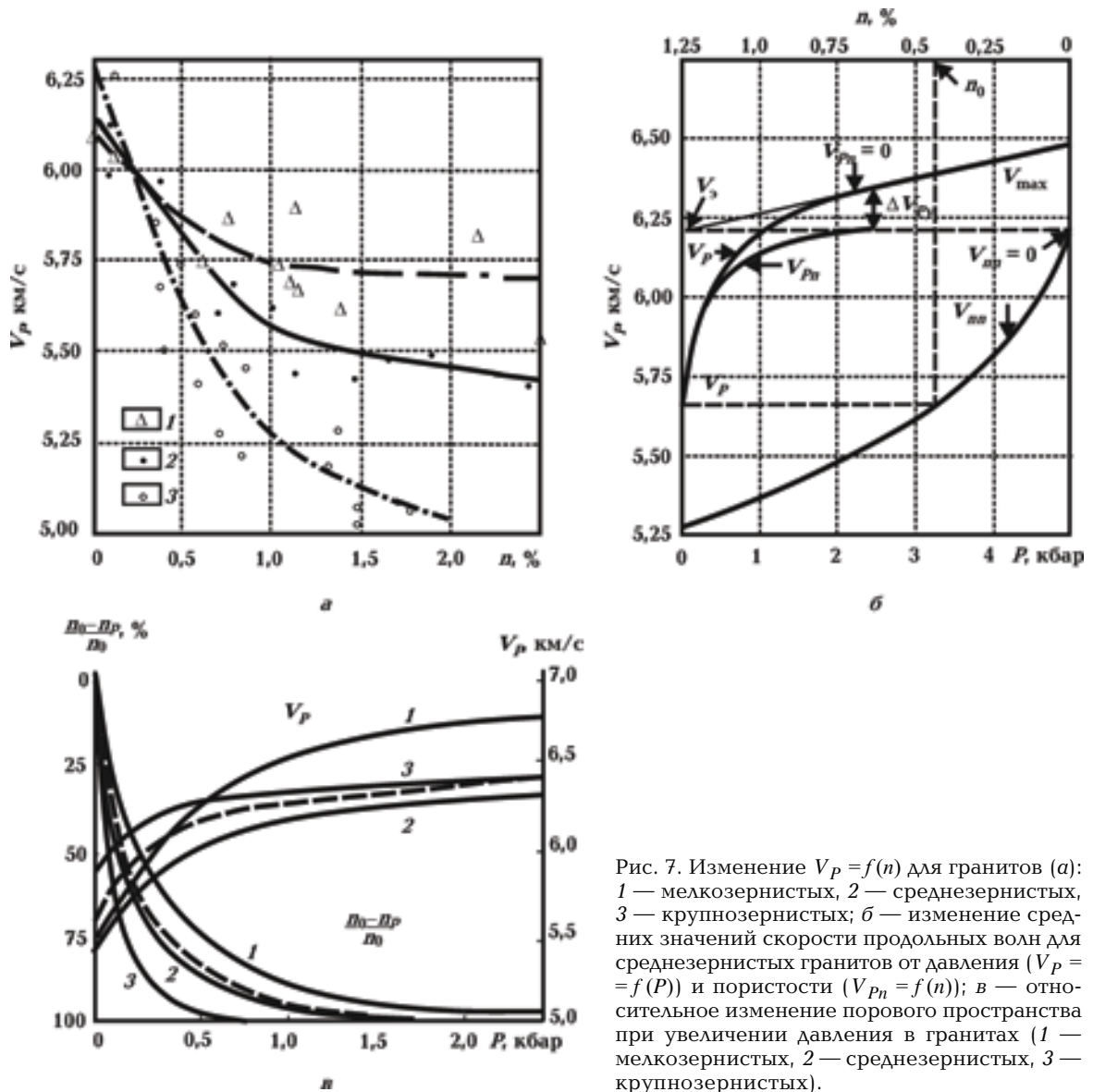


Рис. 7. Изменение $V_p = f(n)$ для гранитов (а): 1 — мелкозернистых, 2 — среднезернистых, 3 — крупнозернистых; б — изменение средних значений скорости продольных волн для среднезернистых гранитов от давления ($V_p = f(P)$) и пористости ($V_{pn} = f(n)$); в — относительное изменение порового пространства при увеличении давления в гранитах (1 — мелкозернистых, 2 — среднезернистых, 3 — крупнозернистых).

плотностей в ЗНС можно предполагать, что здесь пористость пород увеличивается на 10—20 % от их значений на глубине 3—5 км [Корчин, 2014] (горизонтов максимальных значений упругих характеристик пород выше ЗНС).

В зоне пониженной плотности (ЗНС) возможны более активные процессы массопереноса, газовой-жидких флюидов, в том числе углеводородов глубинного происхождения. Здесь, вероятнее всего, происходит активная миграция и локальное накопление этих сред.

Необходимо добавить, что термодинамические условия глубин ЗНС в коре ($H = 4 \div 10$ км, $P = 1 \div 3$ кбар, $T = 150 \div 250$ °С) оказались наиболее приемлемыми для растрескивания газовой-жидких включений. При температуре 120—

160 °С во включениях развивается внутреннее давление порядка 1500—2000 бар, что дает возможность содержащимся во включении газам и флюиду покинуть минерал, локализоваться в свободных областях породы (открытых порах, трещинах). Вслед за активным раскрытием включений, снижением локальных термодинамических напряжений с повышением температуры и умеренном давлении активизируется диффузионный процесс перемещения флюидного вещества и самих включений. Возможна поверхностная диффузия вдоль границы раздела флюид—минерал-хозяин или через минерал-хозяин. Массоперенос и диффузионные процессы в полях статических напряжений в кристаллах, вероятно, могут приводить к значитель-

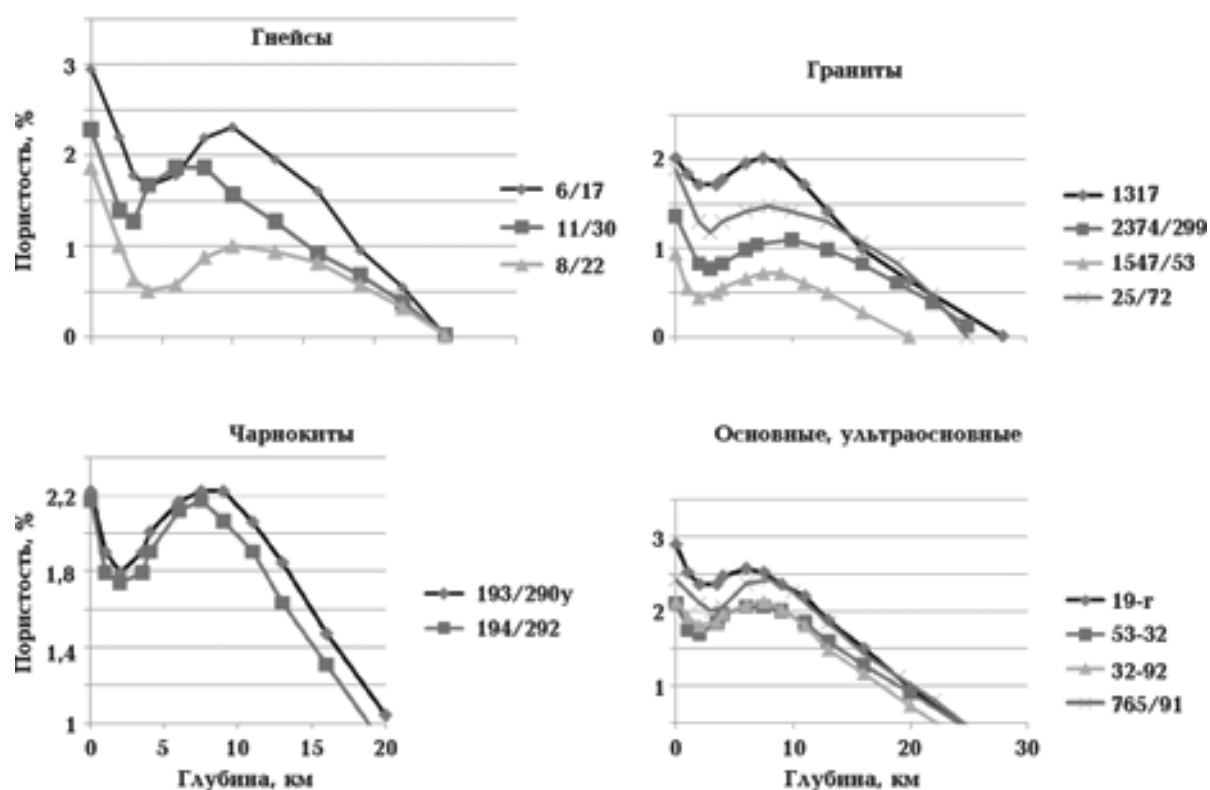


Рис. 8. Изменение пористости в породах в термодинамических условиях соответствующих глубин.

ному перемещению включений. Скорее всего, перекристаллизация минерала-хозяина идет буквально по пятнам за включениями, стремясь уменьшить существующие напряжения, однако оставляя вторичные мелкие включения. Одним из важных моментов в случае напряженного состояния минерала, с увеличением литостатического давления, является стремление мелких включений к объединению, слиянию за счет миграции мелких включений к большим, которые будут находиться уже в новых метастабильных условиях соответствующих глубин. Есть предположения, что сблизившиеся включения могут срастаться даже под влиянием напряжений, вызванных высоким гидростатическим давлением, если оно больше давления во включении [Рейдер, 1987]. Таким образом, в результате процесса расшнурования, массопереноса и диффузии с увеличением действующих на породу давлений и температур выше определенного порога начинается локализация содержимого раскрытых включений. Исследуя оптическими методами (шлиф, аншлиф) отдельные минералы и межзерновые границы, в основном подтвержден описанный выше механизм преобразования породы в результате декрепитации при высоких давлениях и температурах. Так,

в образцах пород, испытывавших воздействие PT , соответствующих зонам ЗНС, наблюдается увеличение газовой-жидких включений (особенно по краям зерен), появляются локализации в виде стоков мелких новообразованных включений в местах ранее существовавших микротрещин, наблюдаются следы газовой-жидкой среды включений на стенках минералов и в межзерновых пространствах.

В работе [Рейдер, 1987] опубликованы результаты 12 анализов отдельных 10 минералов из интрузивных пород, полученных при дроблении в вакуумной шаровой мельнице. Они показали, что среднее содержание CH_4 составляет 64 % по объему (без учета воды), а содержание водорода колеблется от 3,5 до 44 %. Из 100 г породы при этом высвобождаются десятки миллилитров газа. Некоторые авторы отмечают, что в опытах при разрушении пород в высоком вакууме выделялись вещества H_2 , CH_4 , H_2O , N_2CO_2 и что объемы большинства газов "соответствовали нескольким сотням кубических метров каждого из них (для различных пород по-разному) на тонну породы" [Рейдер, 1987, с. 173]. При исследованиях включений зерен кварца установлены верхние границы захвата жидких углеводородов ниже $200^\circ C$. Вы-

ше 250 °С → газообразная форма. С поправкой на давление эти величины несколько ниже. Таким образом, мы возвращаемся по *PT*-параметрам к ЗНС, даже когда выделения включений диффузионно локализуются.

Как было показано, в зоне ЗНС пористость пород увеличивается на 10—20 % от возможных ее значений на глубине 3—5 км. Эта разуплотненная область коры, вероятнее всего, заполняется флюидами и газом (метаном), высвобождающимися в результате декрепитации и диффузии из литосферы. Достигая определенного давления они проникают на поверхность. Интересно, что в водах Черного моря над аномальными коровыми ЗНС растворено 80 млрд м³ метана и это, несмотря на то, что воды впадающих рек не содержат его. Все это свидетельствует о мощном постоянном подтоке углеводородов из недр. Как показывают замеры, вблизи ЗНС со дна Черного моря поднимается поток углеводородного газа дебитом 172 тыс. м³/сут на участке площадью 16 км². По лабораторным анализам в газе содержится 94,5 % CH₄ и около 4,5 % этана. Таким образом, со дна Черного моря в сутки поступают миллионы кубических метров метана [Герасимов и др., 2009; Русаков, Кутас, 2014]. Это свидетельствует о возможной связи ЗНС с глубинными скоплениями углеводородов. В зоне пониженной плотности возможны энергетически выгодные процессы массопереноса, миграции газовой-жидких флюидов, в том числе углеводородов глубинного происхождения или образовавшихся в результате декрепитации газовой-жидких включений материнских пород под воздействием термодинамических условий глубин ЗНС [Корчин, 2013 в, 2014].

Заключение. ЗНС наиболее активные горизонты современного преобразования минеральной среды, изменения структурных особенностей земной коры даже в тектонически спокойных регионах (например, кристаллических щитах). Это области наиболее выраженной самоорганизации корового материала нашей планеты. Она претерпевает постоянные динамические изменения. Наличие ЗНС в земной коре является ее неотъемлемой частью, стабилизирующей устойчивость литосферы. В силу ослабленных здесь упругих характеристик пород это область релаксации интенсивных полей напряжений тектонически активных процессов. Здесь на определенных глубинах коры активно включаются механизмы дилатансионного разрушения минеральной среды — явления, о котором упоминалось выше [Николаевский, 1996; Милановский, Николаевский, 2009, 2010]. Тер-

мобарические ЗНС (область пониженных упругих параметров пород, их плотности и повышенной пористости) являются спусковым механизмом интенсивных релаксационных процессов в земной коре тектонически активных регионов в виде образования здесь очагов землетрясений и разломов различной направленности, а также образования некоторых сейсмических границ, регистрируемых сейсмическими методами. Подтверждением этому служит наличие на глубинах ЗНС наибольшего количества очагов коровых землетрясений (рис. 9).

Необходимо добавить, что сейсмическая граница K_2 в земной коре, вероятно, имеет также термобарическую природу и является результатом интенсивного роста V_p вслед за зоной инверсии скорости. Однако не исключено, что интенсивный рост скоростей в ЗНС дополнительно связан с изменением пород от низкоскоростных к высокоскоростным. При этом глубинные термобарические условия способст-

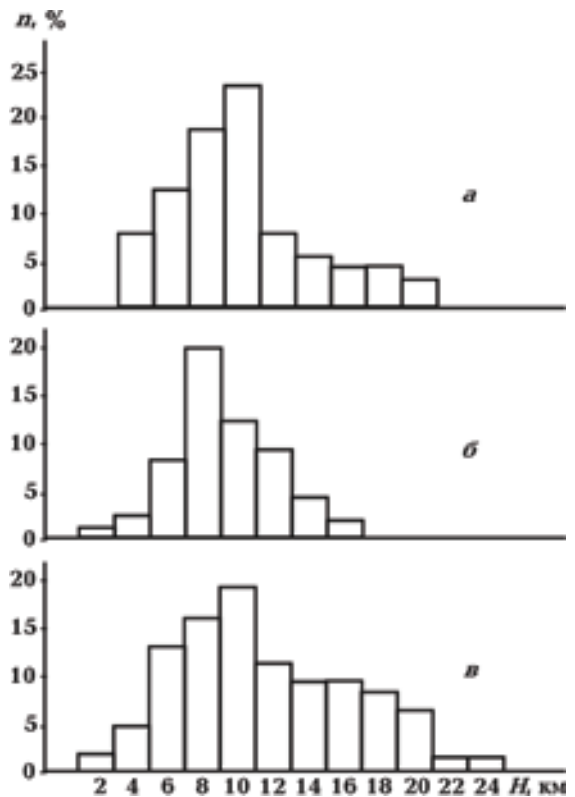


Рис. 9. Гистограммы распределения по глубине: *а* — фокусов землетрясений, зарегистрированных на территории Финляндии в интервале $H = 5 \div 25$ км [Трипольский, Шаров, 2004]; *б* — центров ЗНС для щитов [Трипольский, Шаров, 2004]; *в* — минимальных значений экспериментальных скоростей $V_{p\text{экс}} = f(PT)$ в ЗНС [Корчин, 2013 а].

вуют более высокому скачку скорости [Корчин, 2013 а].

ЗНС — геоактивная область коры, где происходят наиболее интенсивные современные преобразования породы за счет миграции глубинных флюидов и других форм массопереноса газообразных и жидких сред, дифференциации глубинных растворов, формируя в отдельных областях локализации полезных ископаемых. Таким образом, коровые ЗНС могут быть глубинным поисковым критерием полезных ископаемых.

ЗНС и связанные с ними глубинные явления и процессы наиболее доступны исследованию различными геолого-геофизическими методами, в том числе сверхглубоким бурением [Кольская ..., 1984; Корчин, 2013 а; Кузин, 2010; Павленкова, 2006], что способствует их наиболее детальному и перспективному изучению с целью поисков полезного минерального сырья и уточнения глубинного строения Земли, объяснения и предсказания процессов коровых землетрясений, образования новых разломных структур и сейсмических границ.

Список литературы

- Алерс Д. Ж. Использование измерений скорости звука для определения температуры Дебая в твердом теле. В кн.: *Динамика решеток*. Москва: Мир, 1968. С. 13—61.
- Буртный П. А., Корчин В. А., Карнаухова Е. Е. Моделирование вещественного состава глубинных горизонтов земной коры (новая концепция интерпретации геофизических данных). LAP Lambert Akadem. Publ., 2013. 188 с.
- Гегузин Я. Е., Кривоглаз М. А. Движение макроскопических включений в твердых телах. Москва: Металлургия, 1971. 344 с.
- Герасимов М. Е., Коболев В. П., Лукин А. Е. Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 6. С. 167—170.
- Кольская сверхглубокая. Под ред. Е. А. Козловского. Москва: Недра, 1984. 490 с.
- Корчин В. А. Влияние тепловых режимов Земли на коровые зоны низких сейсмических скоростей. *Материалы Междунар. конф. "Шестые научные чтения памяти Ю. П. Булашевича"*. Екатеринбург, 2011 а. С. 199—201.
- Корчин В. А. Петрофизические особенности зон низких сейсмических скоростей в земной коре и их термобарическая неустойчивость. *Материалы XVII Всерос. конф. с международным участием "Проблемы сейсотектоники"*, 20—22 сентября, 2011. Москва, 2011 б. С. 273—277.
- Корчин В. О. Зоны низких сейсмических скоростей в земной коре и их петрофизические особенности. *Геодинамика*. 2011 в. № 2 (11). С. 122—124.
- Корчин В. А. Коровые зоны низких скоростей — перспективные горизонты локализаций глубинных углеводородов. *Глубинная нефть*. 2013 а. Т. 1. № 8. С. 1099—1116.
- Корчин В. А. Термодинамика коровых зон низких сейсмических скоростей (новая научная гипотеза). Saarbrücken: Lambert Akadem. Publ., 2013 б. 280 с.
- Корчин В. А. Структурные особенности минеральной среды в РТ-условиях различных глубин земной коры. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 3. С. 49—77.
- Корчин В. А. Термобарическое моделирование аномалий повышенной пористости в горных породах земной коры — горизонтов возможной миграции и локализации глубинных углеводородов. *Глубинная нефть*. 2014. Т. 2. № 9. С. 1434—1448.
- Корчин В. А. Термобарическое петрофизическое моделирование участков земной коры с зонами низких скоростей. *Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы 11-й Междунар. конф.* Москва, 2010 а. С. 147—150.
- Корчин В. О. Корові термобаричні перетворення мінеральної речовини і пов'язане з ними сейсмічне вертикальне розшарування літосфери. *Геодинаміка*. 2010 б. № 1 (9). С. 50—56.
- Корчин В. А. Упруго-плотностное термобарическое

- кое расслоение литосферы, коровые зоны низких сейсмических скоростей. *Материалы III тектонофизической конференции в ИФЗ РАН "Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле"*, 8—12 октября 2012, Москва. Т. 2. С. 390—393.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013. 312 с.
- Кузин А.М. Концепция углеводородной дегазации Земли в интерпретации данных сейсмического. *Международ. науч.-практ. конф. "Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложностроенных структур (Сейсмо-2010)"*, 16—22 сентября 2010 г., пос. Курортное, АР Крым, Украина. 17—26 с.
- Кутас Р.И. Поле тепловых потоков и теоретическая модель земной коры. Киев: Наук. думка, 1978. 140 с.
- Лебедев Т.С., Корниец Д.В., Шаповал В.И., Корчин В.А. Упругие свойства горных пород при высоких давлениях. Киев: Наук. думка, 1972, 183 с.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Шаповал В.И., Правивый А.А. Определение теплопроводности минерального вещества по акустическим измерениям в различных термобарических условиях. *Геофиз. журн.* 1980. Т. 11. № 5. С. 33—39.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И. Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. Киев: Наук. думка, 1986. 198 с.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И., Буртный П.А. Петрофизические исследования при высоких *PT*-параметрах и их геофизические приложения. Киев: Наук. думка, 1988. 250 с.
- Милановский С.Ю., Николаевский В.Н. Процессы переноса (миграции) в системе трещин земной коры. *Международ. науч.-практ. конф. "Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложностроенных структур (Сейсмо-2012)"*, 16—22 сентября 2010 г., шт Курортное, АР Крым, Украина. С. 37—44.
- Милановский С.Ю., Николаевский В.Н. Роль трещиноватости в эволюции земной коры. В сб.: *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Материалы докладов Всероссийской конференции.* Т. 2. Москва: Изд. ИФЗ РАН, 2009. С. 71—103.
- Нащекин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Москва: Высшая школа, 1969. 560 с.
- Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. Москва: Недра, 1996. 447 с.
- Павленкова Н.И. Волновые поля и модели земной коры. Киев: Наук. думка, 1973. 219 с.
- Павленкова Н.И. Флюидный режим верхних оболочек земли по геофизическим данным. В сб.: *Флюиды и гидродинамика.* Москва: Наука, 2006. С. 201—218.
- Рейгер Э. Флюидные включения в минералах. В 2 т. Москва: Мир, 1987. 632 с.
- Русаков О.М., Кутас Р.И. Фата-моргана биогенной доктрины углеводородов в Черном море. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 3—17.
- Трипольский А.А., Шаров Н.В. Литосфера докембрийских щитов Северного полушария земли по сейсмическим данным. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 159 с.
- Korchin V.A., 2006a. Thermobaric Seismic Stratification of the Lithosphere. *12 International Symposium on Deep Structure of the Continents and their Margins. September 24—29, 2006, Shonan Village Centre, Hayama, Japan, NHA-P02.* CD-ROM.
- Korchin V., 2010. Low velocity zones in the Earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal* 32 (4), 70.
- Korchin V.A., Burtny P.A., Karnaukhova E.E., 2006 б. Thermobaric Petrostructural Modeling of the Earth's crust and the Nature of some Seismic Boundaries. *12 International Symposium on Deep Structure of the Continents and their Margins, September 24—29, 2006. Shonan Village Centre, Hayama, Japan, IMC-P05.*

Low velocity zones of thermobaric origin in the crystalline crust

© V. A. Korchin, 2015

The paper presents a new hypothesis of origin, existence and disappearance of crustal low velocity zones (LVZs), discovered by the DSS method as elastic anomalies of the Earth's crust. Complex changes are experimentally obtained for $V_{P,S} = f(PT) = f(H)$ in rocks (regions of velocity inversion are revealed). There is cataclastic decompaction of mineral medium in them — dilatancy phenomenon. Their configuration, location and thermodynamic conditions coincide well with the DSS elastic anomalies. They arise only when the temperature gradient exceeds the certain threshold in the crust and the pressure cannot compensate thermal disturbances of rocks. The presence of LVZs is the objective reality and they can occur everywhere in the Earth's crust. Their thickness can increase due to the increase of intensity of thermal regimes or the zones can disappear due to lowering heat in the lithosphere. Based on the study of relationship between pore space and velocity, an increase is revealed in rocks porosity and joint with depth of the LVZs that stipulates increasing migration and localization of different fluids and hydrocarbons of a deep origin. The LVZs and related to them deep events and processes are the most accessible to study using different geological-geophysical methods, including super-deep drilling. This makes it possible to perform the most detailed and promising studies aiming to search for mineral resources and clarify the deep structure of the Earth, as well as to explain and predict crustal earthquakes.

Key words: physical properties, low velocity zones, thermal regimes, decompaction of rocks, porosity, hydrocarbons localization.

References

- Ahlers D.J., 1968. Using measurements of the speed of sound to determine the Debye temperature in the solid. In: *Lattice dynamics*. Moscow: Mir, 13—61 (in Russian).
- Burtnyy P.A., Korchin V.A., Karnaukhova E.E., 2013. Modeling material composition of the deep horizons of the Earth's crust (a new concept of interpretation of geophysical data). LAP Lambert Akadem. Publ., 188 p. (in Russian).
- Geguzin Ya.E., Krivoglaz M.A., 1971. Movement macroscopic inclusions in solids. Moscow: Metallurgiya, 344 p. (in Russian).
- Gerasimov M.E., Kobolev V.P., Lukin A.E., 2009. Azov-Black Sea landfill studying geodynamics and fluid dynamics of formation of oil and gas fields. *Geofizicheskiy zhurnal* 31 (6), 167—170 (in Russian).
- Kola ultradeep, 1984. Ed. E.A. Kozlovskiy. Moscow: Nedra, 490 p. (in Russian).
- Korchin V.A., 2011 a. Influence of thermal conditions of the Earth's crust in the area of low seismic velocity. *Proceedings of the International Conference "Sixth scientific readings memory Yu.P. Bulashevich"*. Ekaterinburg, 199—201 (in Russian).
- Korchin V.A., 2011 b. Petrophysical characteristics of zones of low seismic velocities in the crust and thermobaric instability. *Proceedings of the XVII All-Russian conference with international participation "Problems seismotectonics"*, September 20—22, 2011, Moscow, 273—277 (in Russian).
- Korchin V.O., 2011 c. Areas of low seismic velocities in the crust and petrophysical characteristics. *Geodynamika* (2), 122—124 (in Ukrainian).
- Korchin V.A., 2013 a. Crustal low-velocity zone — promising horizons of localization of deep hydrocarbon. *Glubinnaya neft* 1 (8), 1099—1116 (in Russian).
- Korchin V.A., 2013 b. Thermodynamics crustal zones of low seismic velocity (a new scientific hypothesis). Saarbrücken: Lambert Akadem. Publ., 280 p. (in Russian).
- Korchin V.A., 2007. Structural features of mineral environment under *PT*-conditions of different depths of the Earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal* 29 (3), 49—77 (in Russian).
- Korchin V.A., 2014. Thermobaric modeling anomalies increased porosity in the rocks of the crust — the possible horizons of migration and localization of deep hydrocarbon. *Glubinnaya neft* 2 (9), 1434—1448 (in Russian).
- Korchin V.A., 2010 a. Thermobaric petrophysical modeling of the Earth's crust with low-velocity zones. *Physical and chemical and petrophysical stu-*

- dies in Earth Sciences. Proceedings of the 11th International Conference. Moscow, 147—150 (in Russian).
- Korchin V.O., 2010 b. Crustal thermobaric transformation of mineral substances and the associated seismic vertical stratification of the lithosphere. *Geodynamika* (1), 50—56 (in Ukrainian).
- Korchin V.A., 2012. Elastic-thermobaric density stratification of the lithosphere, crustal zone of low seismic velocity. *Proceedings of the III tectonophysical conference in IPE RAS "Tectonophysics and topical issues of Earth Sciences"*, 8—12 October 2012, Moscow, 2, 390—393 (in Russian).
- Korchin V.A., Burtyny P.A., Kobolev V.P., 2013. Thermobaric petrophysical modeling in geophysics. Kiev: Naukova Dumka, 312 p. (in Russian).
- Kuzin A.M., 2010. Concept hydrocarbon degassing of the Earth in the interpretation of seismic data. *International scientific-practical conference "Modern methods of seismic exploration in the search for oil and gas in terms of complex structures (Seismic-2010)", September 16—22, 2010, Kurortnoye, Crimea, Ukraine*, 17—26 (in Russian).
- Kutas R.I., 1978. Thermal flux field and the theoretical model of the Earth's crust. Kiev: Naukova Dumka, 140 p. (in Russian).
- Lebedev T.S., Korniets D.V., Shapoval V.I., Kor-chin V.A., 1972. Elastic properties of rocks at high pressures. Kiev: Naukova Dumka, 183 p. (in Russian).
- Lebedev T.S., Korchin V.A., Shapoval V.I., Pravdivy A.A., 1980. Determination of thermal conductivity of mineral matter on acoustic measurements in various temperature and pressure conditions. *Geofizicheskiy zhurnal* 11 (5), 33—39 (in Russian).
- Lebedev T.S., Korchin V.A., Savenko B. Ya., Shapoval V.I., Shepel S.I., 1986. Physical properties of minerals in thermobaric conditions of the lithosphere. Kiev: Naukova Dumka, 198 p. (in Russian).
- Lebedev T.S., Korchin V.A., Savenko B. Ya., Shapoval V.I., Shepel S.I., Burtyny P.A., 1988. Petrophysical studies at high PT parameters and geophysical applications. Kiev: Naukova Dumka, 250 p. (in Russian).
- Milanovskiy S. Yu., Nikolaevskiy V.N., 2010. Transport Processes (migration) in the cracks of the crust. *International scientific-practical conference "Modern methods of seismic exploration in the search for oil and gas in terms of complex structures (Seismic-2010)", September 16—22, 2010, Kurortnoye, Crimea, Ukraine*, 37—44 (in Russian).
- Milanovskiy S. Yu., Nikolaevskiy V.N., 2009. The role of the fracture in the evolution of the Earth's crust. In: *Tectonophysics and topical issues of the Earth Sciences. Proceedings of the All-Russian Conference*, 2. Moscow: IPE RAS Publ., 71—103 (in Russian).
- Nashchekin V.V., 1969. Technical thermodynamics and heat transfer. Moscow: Vysshaya shkola, 560 p. (in Russian).
- Nikolaevskiy V.N., 1996. Geomechanics and fluid dynamics. Moscow: Nedra, 447 p. (in Russian).
- Pavlenkova N.I., 1973. Wave field and model of the crust. Kiev: Naukova Dumka, 219 p. (in Russian).
- Pavlenkova N.I., 2006. Fluid regime of the upper layers of the Earth by geophysical data. In: *Fluids and hydrodynamics*. Moscow: Nauka, 201—218 (in Russian).
- Rader E., 1987. Fluid inclusions in minerals. In 2 vol. Moscow: Mir, 632 p. (in Russian).
- Rusakov O.M., Kutas R.I., 2014. Fata Morgana doctrine of biogenic hydrocarbons in the sea Chorny. *Geofizicheskiy zhurnal* 36 (2), 3—17 (in Russian).
- Tripolskiy A.A., Sharov N.V., 2004. Lithosphere of Precambrian shields of the northern hemisphere of the earth from seismic data. Petrozavodsk: KRC RAS Publ., 159 p. (in Russian).
- Korchin V.A., 2006a. Thermobaric Seismic Stratification of the Lithosphere. *12 International Symposium on Deep Structure of the Continents and their Margins. September 24—29, 2006, Shonan Village Centre, Hayama, Japan, NHA-P02*. CD-ROM.
- Korchin V., 2010. Low velocity zones in the Earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal* 32 (4), 70.
- Korchin V.A., Burtyny P.A., Karnaukhova E.E., 2006 б. Thermobaric Petrostructural Modeling of the Earth's crust and the Nature of some Seismic Boundaries. *12 International Symposium on Deep Structure of the Continents and their Margins, September 24—29, 2006. Shonan Village Centre, Hayama, Japan, IMC-P05*.